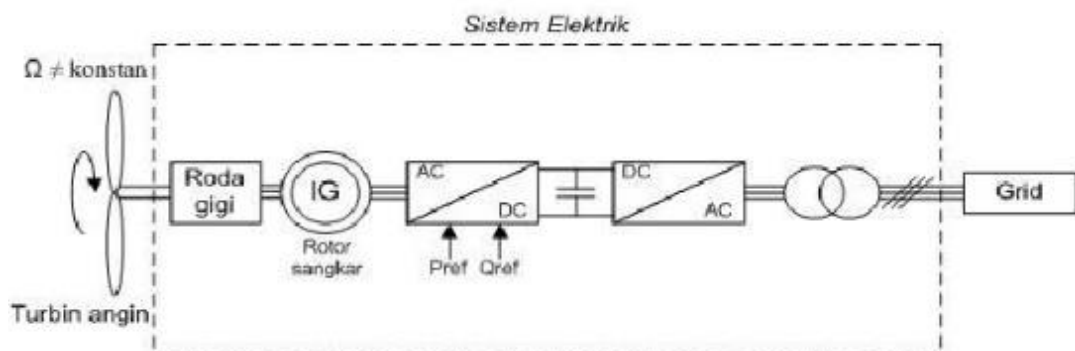


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB)

Pembangkit listrik tenaga angin adalah salah satu pembangkit listrik energi terbarukan yang memanfaatkan energi angin sebagai input pembangkit untuk memutar turbin baik untuk skala kecil maupun skala besar. Secara teknis PLTB berskala kecil lebih mudah untuk dikembangkan karena disamping konstruksinya yang sederhana juga tidak terlalu sulit dalam hal perawatan. Prinsip kerja dari PLTB berskala kecil yaitu memanfaatkan kecepatan angin untuk memutar bilah-bilah yang terhubung ke turbin dan kemudian akan menghasilkan energi mekanik. Generator yang terhubung dengan turbin akan berputar dan menghasilkan energi listrik berupa arus AC (Alternating Current). Arus AC yang dihasilkan oleh generator akan diubah ke arus DC (Direct Current) dan kemudian disimpan pada tempat penyimpanan yang disebut baterai. Arus dari baterai yang masih berupa arus DC akan kembali diubah menjadi arus AC agar supaya bisa disalurkan dan digunakan oleh pelanggan atau konsumen. Proses pemanfaatan energi angin menjadi energi listrik pada pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Proses Konversi Energi Angin Pada PLTB

Untuk menghasilkan energi listrik PLTB memerlukan hembusan angin yang kontinyu dan memiliki kecepatan yang relatif konstan supaya dapat memutar sebuah turbin angin. Besaran energi atau daya yang dapat dihasilkan oleh angin pada kecepatan tertentu yang menabrak sebuah bilah kincir angin dengan luas bidang tertentu dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1.

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot v^3 \quad (2.1)$$

Dimana :

P_w = Daya angin

ρ_a = Kerapatan angin pada waktu tertentu (1,2 kg)

v = Kecepatan angin pada waktu tertentu (m/s)

A = Luas daerah sapuan angin (m²)

Luas daerah sapuan angin dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2.2.

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (2.2)$$

Dimana :

A = Luas daerah sapuan angin (m²)

r = Jari-jari lingkaran turbin/panjang turbin (m)

Pada perancangan pembangkit listrik tenaga angin terdapat koefisien daya (CP) yang dapat mempengaruhi besaran energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin atau disebut daya turbin angin. Besarnya daya turbin angin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3.

$$P_m = C_p \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot v^3 \quad (2.3)$$

Dimana :

P_m = Daya turbin angin

C_p = Koefisien daya

Besarnya jumlah fluks magnet yang mengalir dari rotor menuju stator melalui celah udara akan mempengaruhi daya output yang dihasilkan generator. Daya output generator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.4:

$$P_{out} = V \times I \quad (2.4)$$

Dimana :

P_{out} = Daya output (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron Magnet Permanen

SPM generator memiliki prinsip kerja sesuai dengan hukum Faraday yaitu setiap perubahan medan magnet pada kumparan akan menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) induksi yang sebanding dengan laju perubahan fluks sehingga besarnya gaya gerak listrik yang dihasilkan pada kumparan tergantung pada kecepatan perubahan medan magnet. Fluks magnet dari rotor akan menembus bidang kumparan stator melalui celah udara (air gap) sehingga dapat menimbulkan fluks pada stator. Jika rapat fluks magnet tegak lurus dengan luasan permukaan datar maka fluks magnetik dapat menggunakan persamaan 2.5.

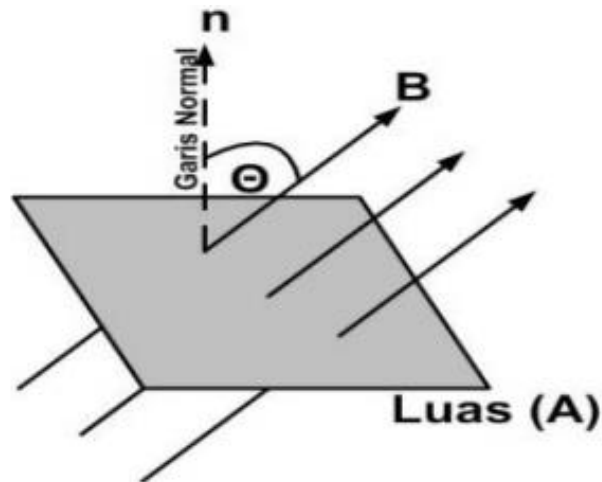
$$\phi = B \cdot A \quad (2.5)$$

Dimana :

ϕ = Fluks magnetik (Wb)

B = Rapat fluks magnet (Wb/m^2)

A = Luas bidang permukaan datar (m^2)



Gambar 2.2 Fluks Magnetik

Gambar 2.2 merupakan arah perpindahan fluks magnetik dari rotor yang menembus kumparan stator dan mengalir melalui celah udara yang berada diantara rotor dan stator sehingga menghasilkan fluks magnetik pada stator.

2.3 Kecepatan Putar Generator

Generator memiliki kecepatan putar yang bervariasi tergantung dari kecepatan angin semakin kuat hembusan angin yang memutar turbin maka kecepatan putar generator akan semakin besar. besarnya nilai output tegangan dan arus generator dipengaruhi oleh kecepatan putar generator. Berikut adalah rumus untuk menentukan kecepatan putar generator.

$$n = \frac{120f}{P} \quad (2.6)$$

Dimana :

n = Kecepatan putar generator (rpm)

f = Frekuensi(Hz)

P = Jumlah kutub/pole magnet

2.4 Konstruksi SPM Generator

SPM generator merupakan salah satu dari beberapa jenis desain generator yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin berskala kecil yang memiliki komponen penyusun sebagai berikut :

2.4.1 Stator

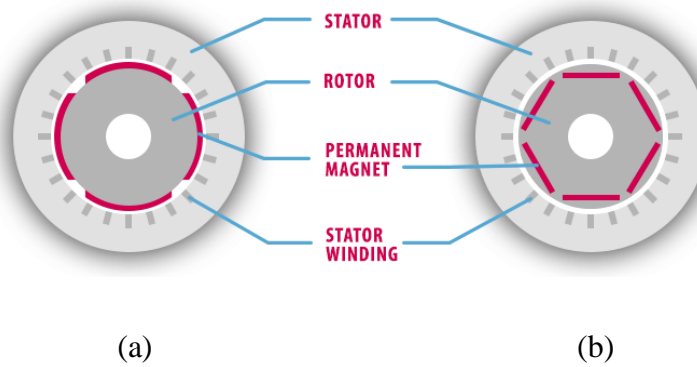
Stator merupakan elemen diam pada generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menghantarkan aliran fluks dari magnet permanen dan sebagai stasioner dari sistem rotor. Stator memiliki bagian teeth (gigi) yang digunakan untuk melilitkan kawat tembaga sehingga aliran fluks dari magnet permanen dapat mengalir ke seluruh bagian stator. Semakin lebar teeth (gigi) stator maka aliran fluks yang mengalir juga akan semakin besar. Stator juga berfungsi sebagai tempat untuk menghasilkan arus listrik yang akan menuju ke beban. Stator memiliki beberapa bagian yaitu :

- a. Rangka stator (stator yoke)
- b. Inti stator (stator core)
- c. Kumparan stator

2.4.2 Rotor

Rotor merupakan bagian generator yang berputar pada sumbu rotor yang disebabkan karena adanya induksi magnet dari kumparan stator. Jika rotor berputar maka kumparan medan akan menghasilkan fluks magnet dan kemudian akan memotong konduktor dari stator yang mengakibatkan timbulnya gaya gerak listrik.

Berdasarkan letak magnet permanen, rotor memiliki dua tipe yaitu surface permanen magnet (SPM) dan interior permanen magnet (IPM).



Gambar 2.3 (a) *Surface Permanent Magnet*, (b) *Interior Permanent Magnet*

Gambar 2.3 menunjukkan jenis-jenis generator berdasarkan dari letak magnet permanen terhadap rotor. Gambar yang pertama (a) merupakan jenis generator *surface permanent magnet* atau *SPM Generator*. Magnet permanen pada SPM Generator terletak di permukaan rotor sedangkan gambar yang kedua (b) merupakan jenis generator *interior permanent magnet* atau *IPM Generator* letak magnet permanennya berada didalam bidang rotor.

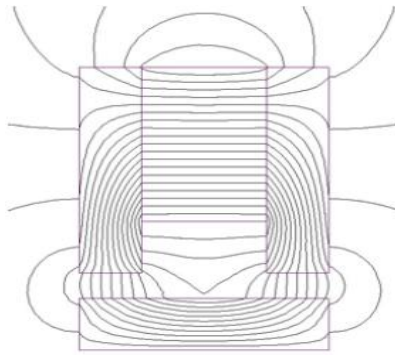
2.4.3 Magnet Permanen

Magnet permanen merupakan sebuah material feromagnetik yang memiliki histerisis loop yang lebar sehingga menunjukkan bahwa pengaruh induksi dari luar terhadap magnet permanen sedikit.

Gambar 2.4 menunjukan sebuah magnet permanen yang menarik sebuah pelat baja dan Gambar 2.5 menunjukan plots fluks magnetik yang mengalir dari magnet permanen melalui celah udara dan menarik sebuah plat baja.



Gambar 2.4 Magnet Permanen dan Plat Baja



Gambar 2.5 Plot Fluks dari Magnet Permanen

Pemilihan material yang digunakan pada magnet permanen sangatlah berpengaruh terhadap kualitas dari magnet permanen tersebut. Semakin baik kualitas material magnet permanen yang digunakan maka energi yang mampu disimpan akan semakin besar sehingga menghasilkan peralatan yang lebih baik.

Berikut ini adalah beberapa jenis-jenis magnet permanen :

1. Magnet Alnico

Magnet alnico memiliki kerapatan fluks magnet yang tinggi namun memiliki gaya koersif yang rendah sehingga ketika dua kutub magnet berada pada jarak yang dekat dengan posisi kutub yang berlawanan maka kedua kutub akan saling melemahkan.

2. Magnet Keramik

Magnet jenis ini sangat banyak digunakan karena memiliki biaya produksi yang relatif rendah. Magnet keramik memiliki kerapatan fluks yang rendah dengan gaya koersif yang tinggi.

3. Magnet Neodymium (NdFeB, NIB atau Magnet Neo)

Magnet Neodymium mampu menghasilkan mesin dengan kualitas terbaik dengan material yang lebih ringan dan rugi-rugi daya yang sedikit karena magnet jenis ini mampu memberikan power density yang tinggi pada

volume material yang kecil. Namun magnet jenis ini masih sangat langka untuk ditemukan.

4. Magnet Samarium-Cobalt

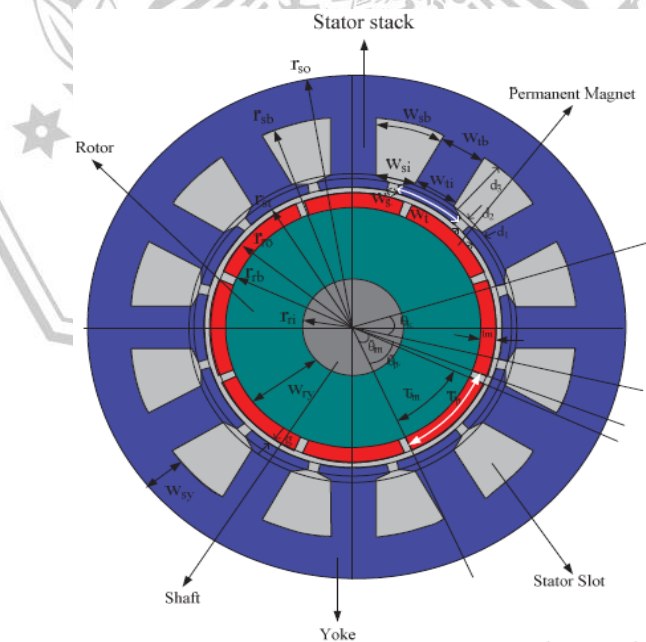
Magnet Samarium-Cobalt yaitu perpaduan antara samarium dan kobalt dan salah satu magnet bumi yang sangat langka karena dikenal sangat kuat.

2.4.4 Celah Udara (Air Gap)

Celah udara adalah bagian generator yang membatasi antara bagian stator dan rotor supaya tidak terjadi gesekan secara langsung. Celah udara juga memiliki peran sebagai jalur untuk perpindahan aliran fluks magnet dari rotor menuju stator. Fluks magnet yang mengalir melewati celah udara tidak sepenuhnya berada di jalur yang diharapkan tetapi menyebar ke sekeliling udara.

2.5 Variabel Desain SPM Generator

Dalam merancang sebuah generator diperlukan beberapa variabel atau parameter yang digunakan dalam melakukan pembuatan atau pemodelan sebuah generator. Model referensi generator dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Model Referensi SPM Generator

Gambar 2.6 merupakan sebuah model referensi SPM Generator yang dilengkapi dengan beberapa variabel dan parameter yang digunakan dalam melakukan perancangan sebuah generator.

2.5.1 Desain Dimensi SPM Generator

Perancangan dimensi generator meliputi perancangan keseluruhan bagian dari generator yang terdiri dari D dan L sehingga dimensi generator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.7.

$$D^2L = \frac{Q}{1,11.\pi^2.B_g.ac.K_w.N_s.10^{-3}} \quad (2.7)$$

Dimana :

D = Diameter dalam stator (m)

L = Panjang inti (m)

Q = Daya reaktif (VAR)

B_g = Kerapatan fluks airgap (T)

ac = *Spesific electric loading*

K_w = Faktor lilitan

N_s = Kecepatan putar (Rps)

π = 3.1415926536

Nilai Q dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.8.

$$Q = \frac{P}{\cos\theta} \quad (2.8)$$

Dimana :

P = Daya keluaran (Kw)

$\cos\theta$ = Faktor daya

2.5.2 Desain Dimensi Stator dan Rotor

Persamaan matematis yang dapat digunakan dalam menentukan dimensi stator dan rotor adalah sebagai berikut :

Menghitung lebar gigi stator (W_{ts}) menggunakan persamaan 2.9.

$$W_{ts} = \frac{p \cdot B_g \cdot A_{pr}}{S_s \cdot L_i \cdot B_{ts}} \quad (2.9)$$

Menghitung luas kutub rotor (A_{pr}) menggunakan persamaan 2.10.

$$A_{pr} = \tau_p \cdot L_i \quad (2.10)$$

Stator pole pitch (τ_p) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.11.

$$\tau_p = \frac{\pi D}{p} \quad (2.11)$$

Panjang efektifitas core (L_i) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.12.

$$L_i = L \cdot K_{stack} \quad (2.12)$$

K_{stack} merupakan faktor tumpukan laminasi stator yang berkisar antara 0,9 – 0,95 jika ketebalan stator sebesar 0,35 – 0,5 mm.

Perhitungan derajat slot (θ_s) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.13.

$$\theta_s = \frac{2\pi}{Z} \quad (2.13)$$

Perhitungan derajat pole/kutub (θ_p) menggunakan persamaan 2.14.

$$\theta_p = \frac{2\pi}{p} \quad (2.14)$$

Perhitungan *coil pitch* (τ_c) menggunakan persamaan 2.15.

$$\tau_c = \text{coil span} \cdot \tau_s \quad (2.15)$$

Dimana $coil\ span = 1$

Perhitungan $slot\ pitch\ (\tau_s)$ menggunakan persamaan 2.16.

$$\tau_s = r_{si} \cdot \theta_p = \frac{D_r}{2} \cdot \theta_p \quad (2.16)$$

Perhitungan stator yoke (Y_s) menggunakan persamaan 2.17.

$$Y_s = \frac{\phi}{2 \cdot L_t \cdot B_{ts}} \quad (2.17)$$

Diameter rotor (D_r) menggunakan persamaan 2.18.

$$D_r = D - 2 \cdot l_g \quad (2.18)$$

Dimana :

B_{ts} = Kerapatan fluks pada gigi stator (1,55 T)

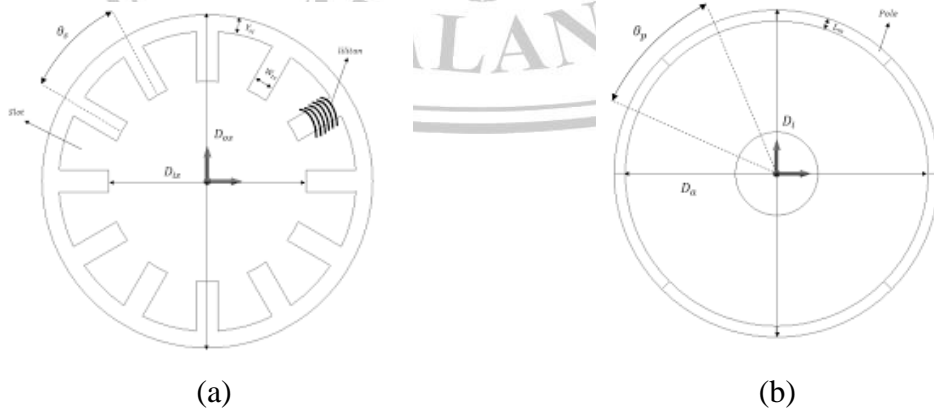
N_s = Jumlah slot

p = Jumlah kutub/pole

r_{si} = Jari-jari dalam stator (m)

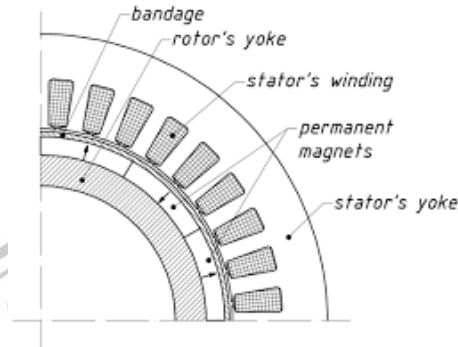
l_g = Diameter celah udara/airgap (m)

D = Diameter dalam stator (m)



Gambar 2.7 (a) Kerangka Stator, (b) Kerangka Rotor

Gambar 2.7 menunjukkan dua buah kerangka yaitu kerangka stator dan rotor. Stator dan rotor merupakan bagian terpenting didalam sebuah generator sehingga parameter stator dan rotor harus ditentukan terlebih dahulu sebelum melakukan perancangan sebuah generator.



Gambar 2.8 Desain Stator dan Rotor SPM Generator

Gambar 2.8 merupakan desain dari *SPM Generator 1/4 model* yang telah tersusun atas beberapa bagian-bagian SPM Generator seperti stator, slot, magnet permanen dan rotor.

2.5.3 Ukuran Magnet Permanen

Spesifikasi dari magnet permanen dapat diketahui dengan menentukan ukuran dari magnet permanen. Ukuran atau dimensi magnet permanen dapat menggunakan beberapa persamaan sebagai berikut :

Jika koefisien permeance (P_c) dan kerapatan fluks airgap (B_g) nonlinier maka dapat dihitung menggunakan persamaan 2.19.

$$P_c = \frac{l_m.A_g}{l_g.A_m} \quad (2.19)$$

Perhitungan luas penampang magnet (A_m) menggunakan persamaan 2.20.

$$A_m = \frac{\phi_r}{B_r} \quad (2.20)$$

Perhitungan luas penampang airgap (A_g) menggunakan persamaan 2.21.

$$A_g = \frac{\phi_g}{B_g} \quad (2.21)$$

Perhitungan fluks airgap (ϕ_g) menggunakan persamaan 2.22.

$$\phi_g = K_1 \cdot \phi \quad (2.22)$$

Perhitungan fluks magnet permanen (ϕ_r) menggunakan persamaan 2.23.

$$\phi_r = \phi \left(1 + K_r \frac{R_g}{R_m} \right) \quad (2.23)$$

Dimana :

P_c = Koefisien permeance

l_m = Tebal magnet (m)

l_g = Lebar airgap (m)

ϕ_r = Fluks magnet permanen (Wb)

ϕ_g = Fluks airgap (Wb)

R_g = Hambatan airgap (Ω)

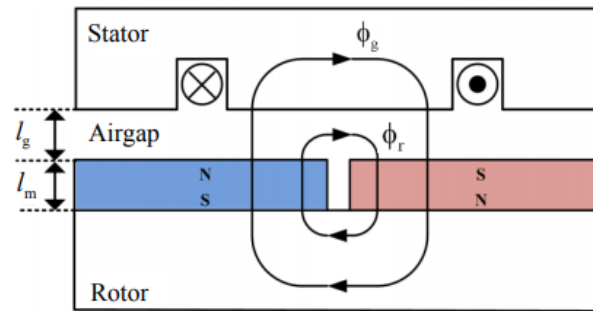
R_m = Hambatan airgap (Ω)

B_r = Kerapatan fluks sisa pada magnet (Wb)

B_g = Kerapatan fluks airgap (Wb)

K_1 = Faktor leakage

K_r = Faktor hambatan



Gambar 2.9 Diagram Skematik SPM Generator

Gambar 2.19 menunjukkan diagram skematik dari SPM Generator dengan bagian-bagiannya seperti stator dan lilitan, magnet permanen dengan dua kutub yaitu kutub utara dan selatan, airgap (celah udara) dan rotor.

2.6 Mekanisme Torsi Cogging

Torsi cogging adalah letutan torsi akibat interaksi antara magnet permanen, stator dan rotor. Pada dasarnya torsi cogging disebabkan karena variasi dari medan energi magnetik pada magnet permanen dengan posisi sudut mekanik rotor (θ). Torsi cogging dapat dihitung pada setiap perubahan posisi sudut mekanik rotor. Sehingga posisi sudut mekanik rotor untuk tiap periode torsi cogging dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.24.

$$T_{cog} = -\frac{1}{2} \Phi_{\delta}^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (2.24)$$

Dimana :

T_{cog} = Torsi Cogging (Nm)

Φ_{δ} = Fluks Air Gap (Webber)

R = Reluktansi Air Gap

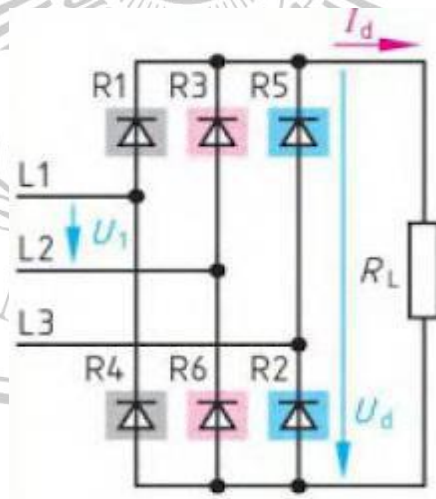
θ = Sudut mekanik rotor

2.7 Rangkaian Penyearah (Rectifier)

Penyearah gelombang adalah sebuah rangkaian elektronika yang digunakan untuk mengubah arus listrik bolak-balik (ac) menjadi arus listrik searah (dc). Penyearah gelombang memiliki beberapa jenis yaitu penyearah setengah gelombang dan penyearah gelombang penuh.

Pada rangkaian penyearah setengah gelombang terdapat satu buah dioda yang digunakan untuk menyearahkan gelombang arus listrik. Sedangkan penyearah gelombang penuh menggunakan lebih banyak dioda tergantung dari beban yang digunakan. Untuk beban kecil digunakan penyearah gelombang penuh 1 fasa yang memiliki 4 dioda dan pada beban yang membutuhkan daya yang lebih besar biasanya menggunakan penyearah gelombang penuh 3 fasa dengan 6 buah dioda sebagai komponen utama.

Penyearah gelombang penuh tiga fasa merupakan kombinasi dari dua penyearah setengah gelombang yang bekerja secara bergantian sehingga menciptakan gelombang penuh sinus 360 deg. Rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 2.10 Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh 3 Fasa

Gambar 2.10 menunjukkan sebuah rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa menggunakan enam buah dioda sebagai komponen utama dalam

meyearahkan gelombang listrik ac. Setiap fasa terhubung dengan sepasang dioda yaitu fasa U terhubung dengan dioda 1 dan 2, fasa V terhubung dengan dioda 3 dan 4 kemudian fasa W terhubung dengan dioda 5 dan 6. Dioda R1, R2 dan R3 berada pada sisi positif (+) beban sedangkan dioda R4, R5 dan R6 berada pada sisi negatif (-) beban.

Prinsip kerja dari penyearah gelombang penuh 3 fasa adalah ketika dioda 1, 3, 2 dan 4 aktif maka akan membentuk jaringan atau gelombang pada fasa U, kemudian saat dioda 3, 5, 4 dan 6 bekerja maka akan membentuk gelombang pada fasa V dan begitupun dengan dioda 5, 1, 6, dan 2 bekerja maka akan membentuk gelombang pada fasa W. Jadi dioda 1, 3 dan 5 menciptakan gelombang positif pada tiap fasa atau mengumpankan rel positif sedangkan dioda 2, 4 dan 6 menciptakan gelombang negatif atau mengumpankan rel negatif.

Tegangan output rata-rata (V_{dc}) dengan beban R dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.654 \times E_{ph} \quad (2.26)$$

Dengan :

V_{dc} = Tegangan output rata-rata (Volt)

E_{ph} = Tegangan maksimum (Volt)

Tegangan Fasa Generator :

$$E_{ph} = 4,44.f. N_c. K_w. K_s. \Phi. \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (2.27)$$